

風 洞 簡 介

Wind Tunnel

游 繁 結*

Fan-chieh Yu

一、前 言

往昔風洞 (Wind tunnel) 均被應用在航空工程方面之試驗，以其所產生之風壓 (Wind pressure) 觀測飛機受風壓之各種變化狀況。斯後由於流體力學及各門科學之日新月異，風洞之使用範圍逐漸廣泛，成爲一種不可缺之模型試驗工具。因此流體力學或氣體動力學之科學試驗者均須了解風洞之原理才能做出各種試驗。

邇來藉風洞做各種試驗，效果非凡，諸如末勝海⁽¹⁾之海岸砂防之基礎研究，坂上務⁽²⁾之山地降雨量研究，樺山德治⁽³⁾之堤防飛砂防治效果，西力造⁽⁴⁾之前砂丘安定法之研究及 R. A. Bagnold⁽⁵⁾之飛砂及砂丘之物理觀察等。惟目前國內風洞之使用尙未普遍，有鑒於此，筆者乃不揣冒昧，願就所學對風洞做一簡單介紹，並提供一簡單之風洞作法。筆者學識淺陋，管見所限，疵謬難免，尙祈諸先輩不吝賜教，感甚幸甚。

二、風洞之原理

水一般被視爲非壓縮性流體 (Incompressible fluid)，此並非水完全屬於非壓縮性流體，只是其壓縮性微小。當吾人觀察水流以滿流通過一管道 (Duct or tunnel) 而流出時，常成噴射狀，此實爲管壁之壓縮使水流相對地對管壁產生壓力之效果。若使氣體通過一管道時，雖然氣體通常被視爲可壓縮性流體 (Compressible fluid)，設其流速不超過 60~90 m/sec (相當於 200~300 ft/sec 左右) 以上，仍可視爲非壓縮性流體⁽⁶⁾，因此氣體與水在流體力學上具有相同之特性，即滿流通過管道時，對管壁均將產生一壓力。風洞乃利用此原理，使氣流通過一管道所產生之風壓與自然風所產生之風壓具有類似之性質。

風洞內之氣流既需符合非壓縮性之原則，風速就不得超過 60~90 m/sec。又風洞試驗需能適用於自然界中，若自然界之風速經常高於 60~90 m/sec，則風洞試驗即失去其效用。所幸，自然界中風速經常高於 60~90 m/sec 之頻率不多，若有亦僅爲一短期間之特殊情況，非代表性之狀況，是故風洞實可做爲模型試驗工具，其風速需控制在 60~90 m/sec 以下，以此爲條件所作之試驗效果與自然環境下之試驗效果一樣。

綜觀前述，風速在 60~90 m/sec 以下，氣體應視爲非壓縮性流體。當流體通過一密閉管路，其壓力與密度無關⁽⁶⁾，然壓力與風速之關係究竟如何？可由紐頓 (Isaac Newton) 首倡之關係式知壓力與風速之平方成正比⁽⁷⁾，其關係式如下：

$$P = KV^2 \dots\dots\dots(1)$$

式中 P：風壓 (Wind pressure) kg/m²

V：風速 (Wind velocity) m/sec

K：常數 (Constant)，可由風洞試驗中求出。

又風壓在風洞內並非永不變的，乃隨氣流在風洞內流動距離之增加而遞減，其變化情形可由下式⁽⁶⁾

* 國立中興大學水土保持學系四年級學生

Senior, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University

求出，即

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{4\tau_0}{D} + \rho V^2 \frac{d\beta}{dx} \quad (2)$$

式中 p : 壓力 (Pressure)

τ_0 : 剪應力 (Shear stress)

D : 管徑 (Diameter)

ρ : 流體密度 (Density)

V : 速度 (Velocity)

β : Momentum correction factor

若完全滿流時， $d\beta/dx=0$ ，由(2)式即得

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{4\tau_0}{D} \quad (3)$$

式中“ $-\frac{dp}{dx}$ ”之負號即表示壓力 P 隨距離 x 之增加而遞減，再由(3)式可知壓力之遞減乃受管壁剪應力之影響所致。但氣體壓力之遞減大都受摩擦阻力之影響，而剪應力與摩擦係數 (Friction factor) 之關係為

$$\tau_0 = f \frac{\rho V^2}{8} \quad (4)$$

將 τ_0 代入(3)式，即得

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{4}{D} f \frac{\rho V^2}{8}$$

或 $-\frac{dp}{dx} = \frac{f}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$

式中 f : 摩擦係數 (Friction factor)

$\frac{\rho V^2}{2}$: 動壓力 (Dynamic pressure)

則可得一壓力變化與速度變化之關係式。若為一定之管徑與摩擦係數，流體係非壓縮性，其密度亦視為不變，欲求出某點壓力之變化時，測出該點之風速即可。抑尤進者，在特殊情況下，欲求可壓縮性流體之壓力變化時，風洞之風速務必高於 $60 \sim 90$ m/sec 以上，則此時其密度變化不定，勢將影響壓力之變化，(1)式即不適用，而其壓力變化關係式需更改為

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{f}{D} \frac{\rho V^2}{2} + \beta \rho V \frac{dV}{dx} \quad (6)$$

此時壓力之遞減除受摩擦阻力之影響外，還受流體流動之動量所影響，此種關係極為複雜，暫不加以討論。

三、風洞之構造

風洞在基本構造上大抵可分為四部份，即(1)風扇 (Fan-motor)，(2)管道 (Tunnel)，(3)漏斗狀開口 (Mouth)，(4)附屬儀器等。茲分別介紹如下：

(1) 風扇 (Fan-motor)

一部風洞其氣流流動之原動力需藉一部風扇之鼓動空氣，使氣流順著管道而流動。一般風扇之按置有兩種方式，一為抽風式，另一為送風式，何者較理想需視實際情形而選擇，惟一般採用抽風式者居多，其優點⁽⁵⁾為 (a) 吸入之氣流不會受旋轉之風扇所擾亂。 (b) 毋需採用有小洞之平板裝置，以轉變旋轉氣流成平行氣流。 (c) 可保護風洞內有活動性之門或涵蓋。

(2) 管道 (Tunnel)

管道為氣流通過之主要部份，為一密閉管路，僅首尾兩端有開口，頂部與底部大都以三合板製成。兩側鑲嵌以玻璃板以便於觀測或攝影之用。再者，管道之長度無一定之規定，可能範圍內以愈長氣流愈平穩為愈佳，但過長時風扇之作用可能無法達到，故通常隨試驗之需要斟酌長短。又管道太長時，非一塊三合板或玻璃板所能做成，此時可分節製造，每節之長度約 1 公尺，然後再加以接合即可，最適宜而有平穩氣流之管道長度以 10 公尺為最適宜⁽⁵⁾。

(3) 漏斗狀開口 (Mouth)

抽風式風洞之前端或送風式風洞之末端均有一漏斗狀開口之裝置，其裝設之主要目的在避免氣流流入或流出時造成渦流 (Eddy current)，並促使送風式風洞之氣流容易發散出去，以保持平穩之氣流。

(4) 附屬儀器

風洞除了上所介紹之三種主要部份外，另外尚需有測定風速之儀器與其他特殊試驗所需之裝置。測定風速之儀器大致可分為

- (a) 有旋杯 (Cups) 之普通風速計——主要用於測定較長時間之平均風速，如魯賓遜旋杯風速計即是。
- (b) 熱線風速計——由熱線對冷熱感度之感應而記錄風速，可同時測定不同高度之風速，但不適合在飛砂粒徑較大之氣流中測定風速。
- (c) 由風壓以測定風速——主要儀器為皮特管 (Pitot tube)，在風洞內垂直或水平分佈各點之風速皆可藉皮特管而測定之，故皮特管大都被用來測定風洞內之風速。一般在非密閉管路中用來測定液體流速之皮特管如圖 1 所示，係根據伯努利公式 (Bernoulli equation) 而導出之速度公式，即

$$V = \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中 V ：流速 (Velocity)

g ：重力加速度 (Acceleration of gravity)

h ：液體上升高度 (Height)

故若知 h 之高度即可求出流速。由於管道內之氣體非肉眼所能見，其在管內上升之高度不易觀測，亦即 h 不易求出，因此無法求出風速，

故在風洞內測定風速需採用混合式之皮特管，

如圖 2 所示，為靜壓管 (Static tube) 與速度管 (Velocity tube) 所組成，兩者以 U 型管相連接，U 型管內傾入酒精或水銀等易見之液體，當氣流以速度 V 經過時，管內即發生滯流壓力 (Stagnation pressure) 與靜壓力 (Static pressure) 之壓力差，即

$$p_0 - p_1 = h_m (\gamma_m - \gamma_f) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中 p_0 ：滯流壓力 (Stagnation pressure)

p_1 ：靜壓力 (Static pressure)

h_m ：U 型管兩側水銀或酒精之高差

γ_m ：水銀或酒精之比重

γ_f ：流體之比重

則風速即可由下式求得

$$V = \sqrt{2gh_m \frac{\gamma_m - \gamma_f}{\gamma_f}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

圖 1 非密閉管路內之皮特管

Fig. 1. Pitot tube in open liquid stream.

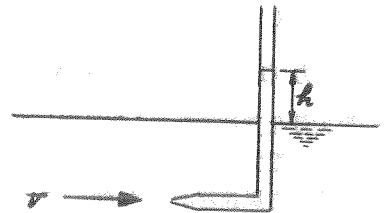


圖2 混合式皮特管

Fig. 2 Pitot tube combined with static tube and velocity tube.

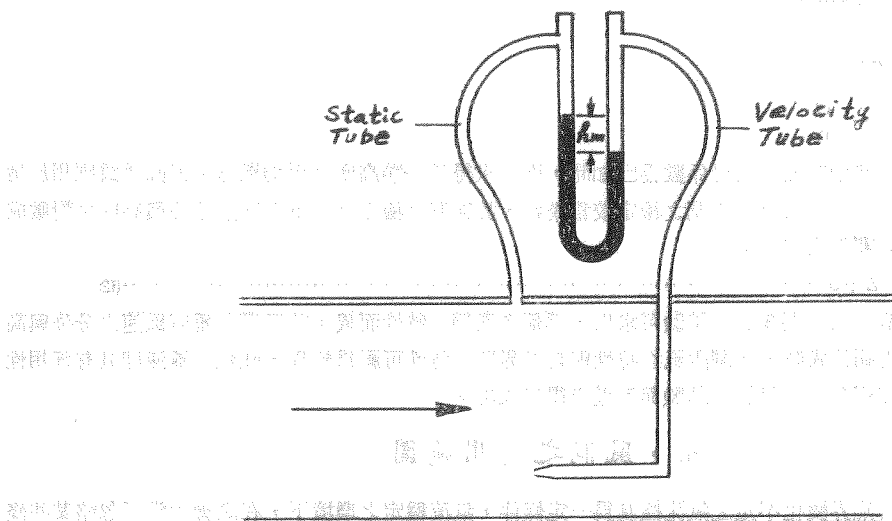
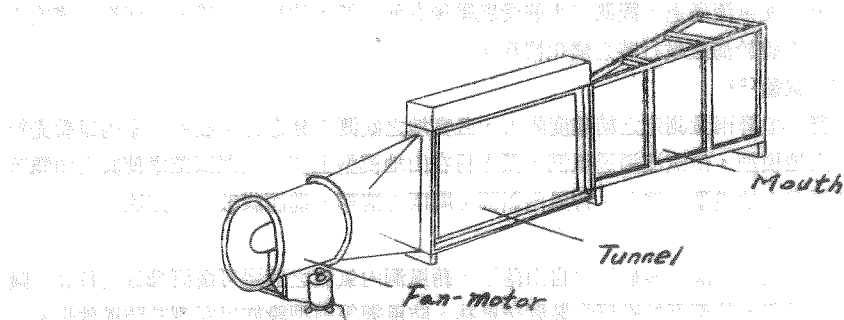


圖3所示即為一簡單而可搬動之風洞⁽¹⁾，圖中包括前面所介紹之風扇、管道與漏斗狀開口等三部分，而皮特管之按置可隨意選擇，故未示於圖上，至於圖3所示之風洞並非為標準型式，其大小、型式可隨試驗所需而適當地加以修改，並非一成不變。

圖3 簡單之風洞

Fig. 3. Wind tunnel



四、風洞精確度之檢定

一部風洞完成後，若未加以檢定，冒然地應用於各種試驗上，將會造成嚴重之誤差，致該試驗失去其意義，故風洞完成後，必須經過檢定才能決定其精確度。

風速之氣流經過整流後，其垂直之風速變化應與自然界風速之垂直變化類似，一般風速之垂直分佈與其高度之對數成直線關係，據河田三治所提出之關係式⁽¹⁾即

$$V(z) = m \log_{10} (Z + Z_0) + \beta \quad (10)$$

$$\text{又 } V(z) = 5.75 V_* [\log_{10} (Z + Z_0) - \log_{10} Z_0] \quad (11)$$

式中 $V(z)$: Z 點高度之平均風速 (cm/sec)

m, β : 係數

Z_0 : 粗糙係數 (cm)

$V_* = \sqrt{\tau / \rho}$: 風之摩擦速度 (cm/sec)

τ : 風之摩擦力 (g/cm^2)

ρ : 空氣密度 (g/cm^3)

由(10)、(11)兩式知

$$V_* = m/5.75$$

$$\log_{10} Z_0 = -\frac{B}{m}$$

若知風速之摩擦速度與地表面之粗糙係數為已知時，則可求得任一點高度之平均風速。但此式為應用於地面上者，其考慮因素較多，若用於風洞之檢定較為繁雜，故風洞之檢定可由垂直風速分佈與高度之對數成直線之關係，簡化其關係式即得。

$$V = a \log Z + b \dots \dots \dots (12)$$

式中 a , b 為一係數，由風洞多次之試驗可求出，為隨各風洞之特性而異。若風洞內垂直風速之分佈與高度之對數符合(12)式之關係式時，風洞內風之特性與自然界風之特性可視為無異，此類之風速即具有實用性。故一部風洞通常需經多次之設計、試驗與改進方得以成功。

五、風洞之應用範圍

由於風洞乃將自然界變化不定之氣流控制為一定條件，氣流穩定之環境下，在試驗中當可忽略某些條件，以從事所需之各項試驗，作為實際應用之參考。目前利用風洞以從事基礎試驗的包括：

(1) 航空工程

在航空工程方面，如飛機在高空受風力影響之情形不易測定之，故利用飛機模型固定於風洞內，使氣流於風洞內通過而觀測在不同風壓下對飛機之影響若何。

(2) 潛水艇之潛行試驗

將潛水艇模型置於風洞內使氣流通過，觀測潛水艇受風壓後有何影響，然後由氣體密度與海水密度之關係換算為海水，即可知潛水艇於海底航行時之變化情形。

(3) 山地降雨量測定之室內試驗⁽²⁾

山地氣流不穩定，影響山地降雨量測定之精確度頗大，且實地之觀測不易進行。故可在室內以螢光粉取代雨滴，在風洞內置一山地模型，使氣流通過風洞，螢光粉在山地模型上空、風洞頂部處使其自由飄落，有如降雨一般，即可觀測在山地模型之迎風、背風兩斜面上降雨之情形，進而謀改進之方法。

(4) 飛砂之基礎研究⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

於風洞地板上鋪一層砂，或以一漏斗裝砂使之自由落下，藉風洞內氣流之通過可觀測飛砂之移動、跳躍，或是砂丘形成、移動之過程，甚至可於風洞內裝置防風林、防風網等模型設施以觀測其防風效果。

(5) 其他。

六、參考文獻

1. 末勝海 (1968) : 海岸砂防工に關する基礎的研究。九州大學農學部演習林報告，第43號，pp.5-7, 38-39, 43, 109。
2. 坂上務 (1969) : 山岳降水量に關する研究。九州大學農學部學藝雜誌第24卷第1號，pp.55-56。
3. 桎山德治・高橋龜九松・笹沼たつ・松岡広雄 (1957) : 風洞實驗による堤防の飛砂防止效果の一考察。林業試驗場研究報告第101號，別刷。
4. 西力造・木村大造 (1966) : 吹上浜砂丘地帯における前砂丘造成による安定法の研究。九州沿山協會，pp. 94-96。
5. Bagnold, R.A. (1965) : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen & Co.

LTD. London, pp.25-27, 38-40.

6. Reuben M. Olson (1972) : Essentials of Engineering Fluid Mechanics. 2nd edition, International Textbook Company, pp.72-73, 219-223, 343-345.
7. 周根泉 (1967) : 臺灣之風及其利用價值。國立臺灣大學理學院地理學系研究報告，第4期，pp. 116-117